

# ZESTAWY GŁOŚNIKOWE

## PODSTAWOWE POJĘCIA (1)

### Cewka głośnikowa

Cewka jest częścią układu napędowego głośnika elektrodynamicznego. Jest ona wykonana z drutu miedzianego lub aluminiowego nawiniętego na karkasie (kapton lub aluminium). Jeżeli przez znajdującą się w stałym polu magnetycznym cewkę płynie prąd elektryczny to powoduje jej wychylenie proporcjonalne do amplitudy napięcia do niej przyłożonego.

### Charakterystyka kierunkowa

Fala dźwiękowa zostaje przez membranę ukierunkowana podobnie jak strumień światła z reflektora. Zjawisko to jednak zależy od częstotliwości. Dla częstotliwości, dla których długość fali jest większa niż obwód membrany, natężenie fali jest stałe we wszystkich kierunkach (fala kulista). Powyżej tej częstotliwości następuje ciągłe zmniejszanie się przestrzennego kąta promieniowania. Zjawisko to opisują charakterystyki ciśnienia akustycznego przy różnych kątach promieniowania, np. 0°, 30°, 60°.

### Częstotliwość rezonansowa

Jest to częstotliwość, dla której ciało o określonej masie pobudzone do drgań, osiąga maksymalną amplitudę drgań przy minimalnej dostarczonej energii. Głośnik jest układem drgającym o określonej masie i sprężystości.

Membrana i cewka głośnikowa stanowią masę zawieszoną na resorze. Dodatkowo na ten układ oddziałują siły tarcia oraz tłumienie elektryczne, będące skutkiem współdziałania układu magnetycznego, cewki i wzmacniacza. Rezonans uwidacznia się zwiększonym wychyleniem membrany dla określonej częstotliwości. Na charakterystyce impedancji głośnika jest widoczny jako pierwsze maksimum. Częstotliwość rezonansowa jest wartością charakterystyczną głośnika. Poniżej tej wartości ograniczona jest możliwość przekazywania energii – od membrany do otaczającego powietrza. Dlatego stanowi ona dolną częstotliwość graniczną.

### D'Appolito

Amerikanin Joe D'Appolito na podstawie badań Linkwiza dotyczących charakterystyk promieniowania systemów wielodrożnych zaproponował ciekawe rozwiązanie. Badania nad systemem

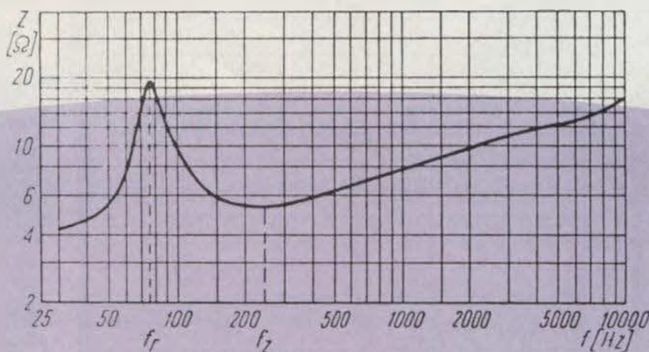
satelita-subwoofer wykazały małą efektywność satelity z jednym głośnikiem 13-centymetrowym. Jednak klasyczny układ takich dwóch głośników, umieszczonych poniżej głośnika wysokotonowego, którego celem miało być zwiększenie efektywności, doprowadził do pogorszenia charakterystyki promieniowania systemu. D'Appolito stwierdził, że można uzyskać prawie optymalną charakterystykę promieniowania, gdy powyżej i poniżej głośnika wysokotonowego zostaną umieszczone głośniki średniotonowe. Rozwiązanie to ściśle określa typ zwrotnicy głośnikowej i maksymalną częstotliwość podziału. Wykorzystując filtr Butterwortha trzeciego rzędu w symetrycznym układzie głośników można uzyskać jednolitą charakterystykę promieniowania osi pionowej. Oznacza to, że przy zmianie pozycji słuchacza w pionie nie dochodzi do niepożądanego zmiany charakterystyki systemu.

### Dobroć Qes

Dobroć elektryczna (Qes) jest miarą elektrycznego tłumienia układu rezonansowego głośnika. Wynika ona z oddziaływania siły magnetomotorycznej na cewkę głośnikową. Wartość Qes określa siłę i efektywność układu magnetycznego głośnika.

### Dobroć Qms

Dobroć mechaniczna (Qms) jest miarą mechanicznego tłumienia układu rezonansowego głośnika w skutek tarcia w zawieszeniu i zawieszeniu centrującym. Wartość Qms umożliwia określenie, z jaką "łatwością" membrana może się poruszać.



Charakterystyka impedancji głośnika

$f_r$  – częstotliwość rezonansu głośnika,

$f_z$  – częstotliwość przy której występuje minimum impedancji głośnika

Od tego numeru rozpoczynamy cykl artykułów na temat konstrukcji zestawów głośnikowych do samodzielnego montażu. Opiszemy zasady działania i zastosowania głośników, typy obudów i ich projektowanie, zwrotnice głośnikowe, sposoby pomiaru parametrów głośników. Przedstawimy także programy komputerowe wspomagające projektowanie zespołów głośnikowych. Zaczynamy od podstawowych, najczęściej spotykanych pojęć techniki głośnikowej.

### Dobroć Qts

Całkowita dobroć Qts układu rezonansowego głośnika jest średnią geometryczną dobroci elektrycznej oraz mechanicznej i opisuje całkowite tłumienie układu rezonansowego głośnika.

$$1/Qts = 1/Qes + 1/Qms$$

Od wartości Qts zależy charakterystyka impulsowa głośnika, a więc i możliwości wykorzystania go w różnych typach obudów. Im mniejsza jest wartość Qts, tym większe jest tłumienie.

J.N.



# ZESTAWY GŁOŚNIKOWE

## PODSTAWOWE POJĘCIA (2)

### Ferrofluid (FFL)

Jest to oleisty płyn o właściwościach magnetycznych umieszczany w szczelinie powietrznej głośnika wysokotonowego. Płyn ten zwiększa tłumienie układu drgającego masa-sprężyna, tzn. zmniejsza wartość  $Q_{ms}$ , co istotnie zmniejsza podbicie impedancji w pasmie rezonansowym. Efektem jest większa obciążalność mechaniczna. Wygładzenie przebiegu impedancji ułatwia współpracę ze zwrotnicą oraz obniżenie częstotliwości podziału. Ferrofluid poprawia odprowadzanie ciepła od cewki, dzięki czemu znacznie zwiększa się odporność termiczna, a więc i obciążalność elektryczna.

### Głośnik współosiowy

Idealna charakterystyka kierunkowa promieniowania systemów wielodrożnych wymagałaby skupienia wszystkich źródeł dźwięku w jednym punkcie. Początkowo głośniki współosiowe miały oddzielny głośnik wysokotonowy przymocowany przed głośnikiem niskotonowym, podobnie jak w głośnikach samochodowych.

Nowe materiały magnetyczne jak *neodym* umożliwiły kompaktową budowę głośników wysokotonowych, tzn. wbudowania go w głośnik niskotonowy. Zaletą głośników współosiowych jest stabilna charakterystyka fazowa przy stałym grupowym czasie przelotu, co często decyduje o spójności obrazu dźwiękowego i jego właściwościach przestrzennych.

### Impedancja głośnika

Impedancja głośnika (znamionowa) jest to najmniejsza wartość modułu impedancji elektrycznej występująca przy częstotliwości leżącej powyżej częstotliwości rezonansowej fr układu mechanicznego głośnika. Zwiększanie się impedancji głośnika przy większych częstotliwościach jest spowodowane indukcyjnością cewki głośnika. Jest to niekorzystna własność głośnika, ponieważ powoduje ona zmniejszenie się poboru mocy ze źródła w miarę zwiększania się częstotliwości (rys.).

### Kevlar

W postaci plecionki z cienkich bardzo mocnych włókien jest stosowany do wytwarzania membran. Membrany kevlarowe o charakterystycznym żółtym kolorze mają bardzo dużą sztywność, co sprzyja szybkiemu przetwarzaniu małych częstotliwości oraz moc-

no nasyconej i energetycznej barwie średnich tonów. W membranach tych często występują "silne" rezonanse, co ogranicza możliwości ich zastosowania.

### Kopułka

Kopułka jest wycinkiem kuli. Bezpośrednio przymocowana do cewki jest najczęściej stosowanym rodzajem membrany w konstrukcjach głośników wysokotonowych. Głośniki kopułkowe, w porównaniu z typową membraną stożkową, mają stosunkowo małą średnicę membrany, dzięki czemu mają lepszą charakterystykę promieniowania. Mała masa układu drgającego poprawia efektywność i szybkość przetwarzania impulsów. Niestety, kopułki mają niewielkie średnice. Jako głośniki wysokotonowe 10÷28 mm, natomiast – rzadziej stosowane – średniotonowe 34÷76 mm. Jednak w tych ostatnich występują problemy z zachowaniem odpowiedniej sztywności przy rozsądnej masie. Najczęściej stosowanym materiałem jest tkanina, metal oraz tworzywo sztuczne.

### Linia transmisyjna (TL)

Jest to typ nierezonansowej obudowy głośnikowej. Funkcjonalnie jest filtrem dolnoprzepustowym z przesunięciem fazy o 90°. Konstrukcje TL opierają się na "Akustycznym labiryncie" Stromberga-Carlsona z 1930 r., składającym się z rury, otwartej na jednym końcu i z głośnikiem na drugim, długości 1/4 długości fali dźwiękowej odpowiadającej częstotliwości rezonansowej głośnika. Dzięki temu w okolicy rezonansu głośnika osiągnięto wzmocnienie przetwarzania. Niestety dla większych częstotliwości faza zostaje tak przesunięta, że dochodzi do osłabienia natężenia dźwięku. Efekty te powtarzają się okresowo, tak że w pasmie niskotonowym ma miejsce wyraźne zafalowanie charakterystyki. Odpowiednie wytłumienie tunelu, np. owczą wełną, prowadzi do spowolnienia fali dźwiękowej i tym samym do skrócenia fizycznej długości linii oraz do wytłumienia składowej emitowanej przez tylną stronę membrany dla większych częstotliwości. Dzięki temu można uzyskać wygładzenie charakterystyki.

### Magnes

W głośnikach do wytworzenia pola magnetycznego wykorzystuje się na ogół magnes

ferrytowy, rzadziej neodymowy lub alnico. Przez metalowy nabiegownik, rdzeń magnetyczny i jego płytę zostaje utworzona szczelina powietrzna, w której porusza się cewka głośnikowa.

### Magnez

Jest to nieszlachetny, srebrzysty metal lekki o wielkiej aktywności chemicznej. Uzyskuje się go na drodze termoelektrolizy z chlorku magnezu. Membrany z magnezu mają dużą sztywność przy małej masie. Głośniki z takimi membranami uznawane są za najlepiej przetwarzające impulsy.

### Membrana

Służy bezpośrednio do przenoszenia energii ruchu na molekuly otaczającego ją powietrza. Przy rozważaniach na temat membrany głośnikowej zakłada się jej nieskończoną sztywność. Pasma przenoszenia takiego głośnika jest ograniczone od dołu częstotliwością rezonansową, natomiast od góry właściwościami powietrza (tzw. impedancją promieniowania). Małe powierzchnie promieniujące są w stanie przetwarzać wyższe częstotliwości niż większe powierzchnie, jednak tylko do pewnej wartości, nazwanej górną częstotliwością graniczną. Powyżej tej wartości przetwarzania energia równomiernie się zmniejsza.

Rzeczywista membrana nie jest nieskończenie sztywna, odkształca się zależnie od właściwości materiału. Odkształcenia te (drżania własne, partialne) mają krytyczny wpływ na charakterystykę kierunkową i przenoszenie wyższych częstotliwości. Również kształt membrany wpływa na właściwości przetwarzania. Membrany lekkowe cechują się dużą sztywnością oraz silnym podbiciem charakterystyki dla wyższych częstotliwości. Bardziej odporne na drżania własne są tzw. membrany *nawi*, o przekroju hiperbolicznym. Membrany kopułkowe charakteryzują trochę węższe pasmo przenoszenia, jednak bardziej wyrównane.

J.N.



# ZESTAWY GŁOŚNIKOWE

## PODSTAWOWE POJĘCIA (3)

### Membrana "sandwichowa"

Membrany tego typu są wykonane z kilku sklejonych ze sobą warstw materiału, dzięki czemu można uzyskać większą sztywność membrany przy stosunkowo niewielkiej masie. Na przykład kilka warstw polipropylenu ma dużą sztywność przy zachowaniu dobrych właściwości tłumienia wewnętrznego drgań. Ciekawym rozwiązaniem są membrany *hexacone*, zbudowane z dwóch warstw laminatu kevlarowego przedzielonych lekkim materiałem o strukturze plastra miodu.

### Obciążalność elektryczna i mechaniczna (moc znamionowa, muzyczna i mechaniczna)

Moc znamionowa, wyrażona w watach, określa maksymalną moc elektryczną, która może być doprowadzona w sposób ciągły do głośnika i przy której nie nastąpi jego zniszczenie. Zniszczenie to na ogół przepalenie cewki, jej deformacja lub odklejenie się od membrany wskutek przegrzania. W normie DIN 45573 opisane są dokładnie warunki pomiarowe. Mocą muzyczną natomiast określa się wartość mocy elektrycznej, która może być na krótki czas doprowadzona do głośnika. Czas trwania i rodzaj sygnału opisują normy.

Moc znamionowa i muzyczna, czyli obciążalność elektryczna, nie jest kryterium jakości głośnika. Nie określa ona nawet maksymalnego natężenia dźwięku, jaki jest w stanie wytworzyć głośnik.

Natomiast tzw. obciążalność mechaniczna opisuje maksymalny poziom sygnału, dla którego np. cewka nie uderza w układ magnetyczny lub wychodzi poza pole magnetyczne, przez co wytwarza zbyt wiele zniekształceń. Parametr ten nie jest definiowany. Jego wartość jest dużo mniejsza niż moc elektryczna. Przykładowo dla głośników średnicy 17 cm wynosi ona ok. 10 W.

### Objętość ekwiwalentna $V_{as}$

Wielkość opisująca podatność zawieszenia membrany w zależności od jej powierzchni. Fizycznie oznacza elastyczność powietrza o objętości  $V_{as}$ , odpowiadającej podatności układu drgającego głośnika.

### Obudowa bas refleks

Obudowa bas refleks (wentylowana) jest rezonatorem Helmholtza i stanowi analogię filtru górnoprzepustowego o nachyleniu zbocza 24 dB/okt. Jest to komora z otworem. Zamknięte w obudowie powietrze ma sprężystość zależną od objętości komory, natomiast powietrze znajdujące się w otworze lub rurze bas refleks ma określoną masę akustyczną. Przez ustalenie, na podstawie objętości  $V_b$ , sprężystości powietrza w obu-

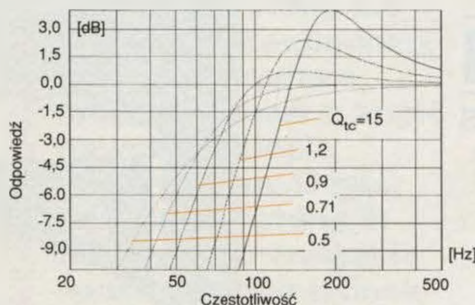
downie i, "zaczepionej" do niego, ruchomej masy akustycznej (powietrze w rurze) można uzyskać konkretną częstotliwość rezonansową  $f_b$ . Taki układ rezonansowy zostaje pobudzony głośnikiem umieszczonym w obudowie. Otwór bas refleks przyczynia się wydatnie do przetwarzania małych częstotliwości. Dzieje się to przez zwiększenie obciążenia akustycznego na tylnej stronie membrany, co istotnie zmniejsza jej wychylenia i promieniowanie (akustycznego przetwarzania) przedniej strony membrany w paśmie rezonansowym.

### Obudowa zamknięta

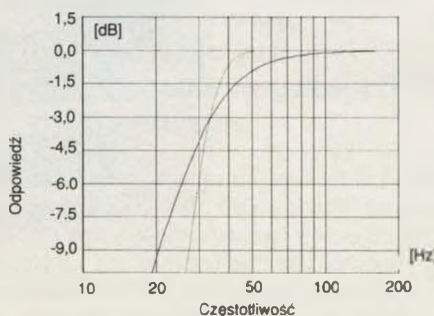
Obudowa zamknięta jest najprostszym typem obudowy głośnika. Stanowi ona analogię filtru górnoprzepustowego drugiego rzędu (12 dB/okt.), którego funkcja przeniesienia jest zależna od rezonansu i tłumienia. Są dwa podstawowe typy obudów zamkniętych: nieskończona przegroda i akustyczne zawieszenie. Na ogół stosowane są obudowy typu akustyczne zawieszenie, w których sprężystość powietrza w obudowie jest dwu- lub trzykrotnie mniejsza od podatności zawieszenia. Powietrze znajdujące się w obudowie działa na głośnik jak dodatkowa sprężyna i powoduje zwiększenie częstotliwości rezonansowej ( $f_c$ ) i dobroci wypadkowej  $Q_{tc}$  głośnika w obudowie zamkniętej. Dobroć  $Q_{tc}$  określa przebieg charakterystyki przeniesienia w funkcji częstotliwości (rys. 1) w zakresie rezonansu (obszar przegięcia rezonansowego).

Znając parametry głośnika ( $Q_{ts}$  – dobroć całkowitą układu rezonansowego,  $f_c$  – częstotliwość rezonansową,  $V_{as}$  – objętość powietrza równoważną podatności zawieszeń) można wyznaczyć objętość obudowy  $V_b$  i częstotliwość  $f_c$ :

$$V_b = \frac{V_{as}}{\left(\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1} [l], \quad f_c = \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1} [\text{Hz}]$$



Rys. 1. Charakterystyka przeniesienia dla różnych wartości  $Q_{tc}$



Rys. 2. Charakterystyka przeniesienia obudowy bas refleks (linia kropkowana) i zamkniętej (linia ciągła)

Typowe wartości  $Q_{tc}$  zawierają się między 0,5 do 1,5. Obudowa zamknięta dostarcza więcej niskiego basu niż obudowa bas refleks przy jednakowej częstotliwości granicznej  $f_{gr}$  (spadek  $-3$  dB) oraz lepiej przetwarza impulsy (rys. 2).

Dzięki łatwości wyznaczenia parametrów obudowy oraz kontroli charakterystyki przeniesienia i dobremu przetwarzaniu impulsów, konstruowanie obudów zamkniętych jest zalecane początkującym hobbistom. ■

# ZESTAWY GŁOŚNIKOWE

## PODSTAWOWE POJĘCIA (4)

### Obudowa tubowa

Już w 1877 r. Thomas Edison próbował blaszaną tubą wzmacniać dźwięki w fonografie. Trudności z wypromieniowaniem małych częstotliwości przez głośnik dynamiczny wynikają z jego znikomej sprawności w tym pasmie.

W celu jej zwiększenia należy poprawić znaczne niedopasowanie membrany do znamionowej impedancji akustycznej środowiska. Analogicznie do transformatora w układach elektrycznych stosuje się transformator mechaniczny w formie tuby. Transformuje ona stosunkowo małą powierzchnię membrany na dużo większą powierzchnię wylotu tuby.

Wymiary tuby, jej długość i powierzchnia wylotu, są zależne od najmniejszej częstotliwości pożądanego pasma i rodzaju tuby (wykładnicza lub stożkowa).

### Pasmo przenoszenia

Wymagania normy DIN 45573 spełniają te głośniki, w których amplituda ciśnienia akustycznego przebiega z tolerancją  $\pm 4$  dB w pasmie przenoszenia od 100 do 8000 Hz. Poza tym pasmem częstotliwości dopuszczalne są większe tolerancje zmiany ciśnienia. Istotne dla jakościowej oceny pasma przenoszenia jest określenie maksymalnych różnic poziomu ciśnienia akustycznego. Dolną częstotliwość graniczną tej samej kolumny można podać dla różnych poziomów spadku, np. 39 Hz przy  $-3$  dB, 34 Hz przy  $-6$  dB i 27 Hz przy  $-10$  dB.

### Pierścień zwierający

Wywołany przepływem prądu ruch cewki głośnikowej powoduje indukowanie się prądu w cewce, który płynie w przeciwnym kierunku. Efekt ten, zwany indukcją wzajemną, powoduje w szczelinie powietrznej modulację drugiej harmonicznej strumienia magnetycznego. Zjawisko to można wyeliminować stosując pierścień zwierający tzw. pierścienia Faradaya. Wytwarza on pole magnetyczne o tej samej wartości co cewka, lecz o przeciwnym zwrocie.

### Polipropylen

Polipropylen jest tworzywem sztucznym o dużym tłumieniu wewnętrznym. Używany jest głównie w membranach głośników średnio- i niskotonowych. Poza dobrym tłumieniem ma łagodny przebieg charakterystyki, niewielkie drgania własne, wysoką stałość parametrów oraz małą sztywność. Mieszając go, np. z kredą, można dobierać twardość, sztywność i tłumienie membrany.

### Poziom ciśnienia akustycznego

Poziom ciśnienia akustycznego określa, w mierze logarytmicznej, stosunek efektywnej wartości ciśnienia akustycznego  $P_{ef}$  do ciśnienia akustycznego dla progu słyszalności  $P_0$ :

$$L_p = 20 \lg \frac{P_{ef}}{P_0} \text{ [dB]; } P_0 = 2 \cdot 10^{-5} \left[ \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right]$$

Zmiana poziomu o 6 dB oznacza podwójną zmianę głośności.

### Sprawność

Sprawność głośnika określa, jaka część energii elektrycznej doprowadzonej ze wzmacniacza może być przetworzona w energię akustyczną. Przy doprowadzonej stałej mocy, im większa jest sprawność głośnika, tym jest on głośniejszy. Sprawność

nie opisuje jednak maksymalnej głośności. Typowe wartości sprawności zawierają się między 0,15% a 2,5%. Oznacza to, że znikomo niewielka część energii zostaje przetworzona. Pozostała jej część zostaje przetworzona w ciepło i musi być odprowadzona przez cewkę i układ magnetyczny. Sprawność można przeliczyć na znamionowe ciśnienie akustyczne SPL (efektywność):

$$\text{SPL} = 112 + 10 \lg \text{ sprawność [dB/W/m]}$$

### Subwoofer

Obudowa pasmowo-przepustowa potocznie jest nazywana subwooferem. Jest ona obudową zamkniętą lub wentylowaną (rys.3), dołączoną do akustycznego filtra dolnoprzepustowego. Dzięki niej (w postaci komory z otworem) po stronie przedniej głośnika jest możliwe uzyskanie korzystniejszej zależności między szerokością pasma a efektywnością i odtwarzanie wyjątkowo małych częstotliwości. Często dzieje się to jednak kosztem zmniejszonej efektywności i pogorszonej charakterystyki impulsowej. Błędny jest pogląd, że obudowy pasmowo-przepustowe są dobrymi filtrami dolnoprzepustowymi. Poza tym wydostające się przez otwór fale stojące wymagają odpowiedniego filtrowania. Metody projektowania obudów są bardzo skomplikowane, dlatego jest bardzo prawdopodobne, że wiele komercyjnych konstrukcji powstało metodą "prób i błędów". Bardzo pomocne w projektowaniu obudów pasmowo-przepustowych są programy symulacyjne.

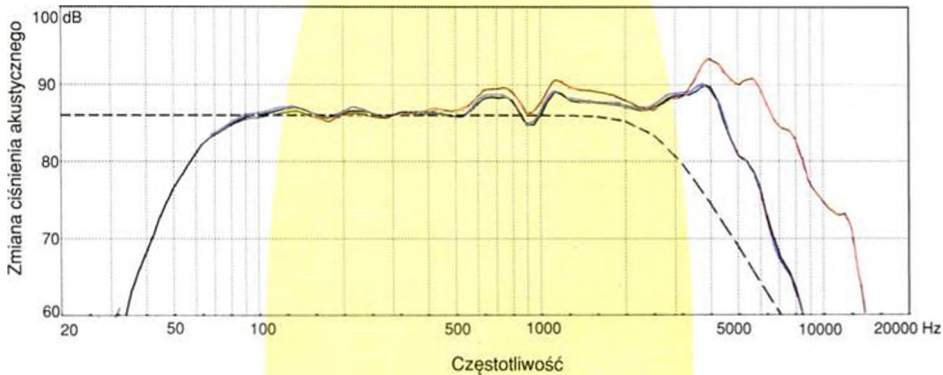
### Variovent

Variovent jest elementem tłumiącym, używanym w obudowach zamkniętych z aperiodycznym tłumieniem. Ma on kształt krążka (ok. 10 cm) z gęstej waty mineralnej lub gąbki grubości 2,5 cm i jest umieszczony w ścianie obudowy. Powoduje nieszczel-

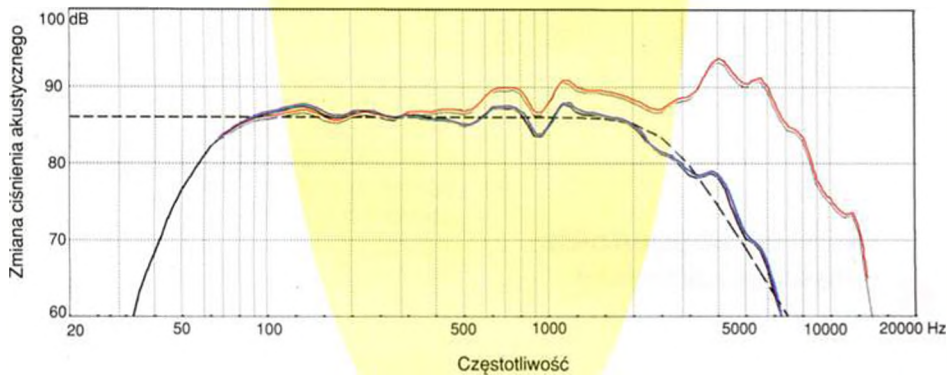




Rys. 3. Obudowa pasmowo-przepustowa a – z zamkniętą komorą, b – z komorą wentylowaną



Rys. 4. Tworzenie pożądanej charakterystyki filtra (teoretycznie). Linia przerywaną oznaczono charakterystykę 3. rzędu Butterwortha, linią czerwoną – charakterystykę głośnika, a niebieską – charakterystykę głośnika z filtrem 2. rzędu Butterwortha



Rys. 5. Tworzenie charakterystyki filtra dopasowanej do rzeczywistej charakterystyki głośnika. Linia przerywaną oznaczono charakterystykę 3. rzędu Butterwortha, linią czerwoną – charakterystykę głośnika, a niebieską charakterystykę głośnika z filtrem 2. rzędu Butterwortha

ność w obudowie o określonej akustycznej rezystancji przepływu i tłumienie rezonansu głośnika zbliżone do 100% wytłumienia obudowy zamkniętej. Dzięki temu możliwe jest zmniejszenie objętości obudowy o około. 50%.

### Włókna szklane

Włókna szklane powstają w procesie wyciągania, wirowania lub dmuchania. Ich grubość wynosi 0,003+0,03 mm. Charakteryzują się dużą sztywnością przy relatywnie małej masie. Używane są do produkcji membran głośnikowych w postaci maty przesączonej żywicami syntetycznymi.

### Włókna węglowe

Cienkie włókna wykonane z węgla są używane do wzmacniania tworzyw sztucznych. W takiej postaci lub jako dodatek do pa-

pieru znalazły również zastosowanie w produkcji membran.

### Współczynnik B-l

Współczynnik ten będący iloczynem wartości indukcji magnetycznej B i długości l drutu cewki znajdującej się w szczeliny powietrznej, określa siłę układu napędowego głośnika. Z reguły, głośniki o dużym współczynniku B-l mają małą dobroć, czyli większe tłumienie. Współczynnik B-l jest wielkością zależną od wychylenia cewki. Dopóki całe uzwojenie cewki znajduje się w szczeliny powietrznej, dopóty zależność jego współczynnika od przemieszczenia pozostaje liniowa.

### Zawieszenie

Zawieszenie jest częścią głośnika, łączącą membranę z koszem i uszczelniającą gło-

śnik. Składa się z zawieszenia zewnętrznego i centrującego. Sprężystość zawieszenia określa podatność głośnika  $C_s$ . W 80% zależy ona od zawieszenia centrującego, a w 20% od zawieszenia zewnętrznego. Zawieszenie centrujące cewkę utrzymuje cewkę we właściwej pozycji w szczeliny powietrznej oraz tłumi drgania własne membrany na jej krawędzi. W bezpośredni sposób wpływa na częstotliwość rezonansową,

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_s \cdot M_d}} - 1 \text{ [Hz]}$$

przy czym:  $M_d$  – masa drgająca głośnika

### Zwrotnica głośnikowa

Zwrotnicę głośnikową można uznać za "serce" zespołu głośnikowego. Jej zadaniem jest wydobyć z całego pasma sygnału wejściowego tych jego części, które po przetworzeniu przez głośniki i zsumowaniu dadzą pożądany przebieg. Na ogół dąży się do uzyskania liniowego przebiegu amplitudy i fazy charakterystyki ciśnienia akustycznego.

Projektowanie zwrotnic pasywnych jest bardzo skomplikowane. Wymaga znajomości rzeczywistych charakterystyk głośników, dokonania wyboru właściwych częstotliwości podziału pasma, właściwego doboru elementów pasywnych i wreszcie przeprowadzenie żmudnych testów odsłuchowych. Oprócz tego niezbędna jest znajomość teorii filtrów elektronicznych.

Zwrotnice są budowane z elementów indukcyjnych, pojemnościowych i rezystywnych, używanych w trzech podstawowych typach filtrów: dolno-, górno- i środkowo-przepustowych, o różnym rzędzie i nachyleniu zbocza : 1. rzędu –6 dB/okt, 2. rzędu –12 dB/okt, 3. rzędu –18 dB/okt, 4. rzędu –24 dB/okt. Na rysunkach przedstawiono charakterystykę filtra 3. rzędu Butterwortha (teoretyczna, do której dążymy – rys 4, 5 linia przerywana), charakterystykę głośnika oraz charakterystykę głośnika z filtrem 2. rzędu Butterwortha o wartościach standardowych wyznaczonych ze wzorów (rys. 4) oraz o wartościach zoptymalizowanych do rzeczywistej charakterystyki głośnika (rys. 5). Żmudny proces projektowania zwrotnic ułatwiają programy symulujące ich działanie. Interaktywne odmiany programów, uwzględniające rzeczywiste charakterystyki głośników, mają dużą wartość dydaktyczną i dostępne są już dla hobbystów. Programy komputerowe nie są jednak gwarancją perfekcyjnych konstrukcji. Projektowanie wymaga wiedzy teoretycznej, doświadczenia i wyuczucia ("know-how").